

# ATLAS DEL HORMIGÓN ARQUITECTÓNICO

## ATLAS OF ARCHITECTURAL CONCRETE

A. López<sup>1</sup>

1.- *Becaria Postdoctoral CONICET-LEMIT. lopezanahi2002@gmail.com*

45

### RESUMEN

El Hormigón Arquitectónico es aquel que genera impacto visual debido a su apariencia estética, la cual se caracteriza por su textura y blancura o color. Existen infinitas alternativas para conseguirlo combinando los materiales apropiados para lograr el color deseado y/o aprovechando los moldes que lo contengan. Independientemente de la apariencia, también puede reunir las propiedades en estado fresco y/o endurecido que cumple cualquier otro tipo de hormigón. A su vez, estará expuesto a diferentes ambientes que modificarán su estado inicial. Sistematizar estas características para poder facilitar el uso del Hormigón Arquitectónico es el principal objetivo del “Atlas”. En este trabajo se presenta una metodología que permitirá abordar los tópicos relacionados con el diseño de mezclas, los aspectos estéticos, los moldes y el entorno de emplazamiento. El plan indica las actividades mínimas a realizar y se ejemplifica aplicando la metodología en morteros coloreados de elevada fluidez. Los resultados iniciales demuestran no sólo la importancia de considerar los diferentes contenidos de pigmentos, ya que los incrementos de pigmento rojo no producen los mismos niveles de variaciones que los del amarillo, sino también que los colores pueden ser distintos para una misma mezcla cementícea.

**Palabras clave:** *atlas, hormigón arquitectónico, color.*

### ABSTRACT

The Architectural Concrete is one that generates visual impact due to their aesthetic appearance, characterized by its texture and whiteness or color. There are infinite ways to achieve this, through the combination of appropriate materials in order to obtain the desired color and /or taking advantage of the molds that contain it. Regardless of the appearance, it can also meet the properties of any other

type of concrete in fresh and / or hardened state. In turn, it will be exposed to different environments which modify its initial state. To systematize these features in order to facilitate the use of Architectural Concrete is the main objective of “Atlas”. In this paper it is presented a methodology that will allow to address topics related to the design of mixtures, aesthetic aspects, molds and site environment. The plan indicates the minimum activities to perform and as an example, applies the methodology on high fluidity colored mortars. Initial results show not only the importance of taking into account the different contents of pigments, since the increases of red pigment do not produce the same change levels than that of yellow, but also colors may be different for the same cementitious mixture.

**Keywords:** *atlas, architectural concrete, color.*

## INTRODUCCIÓN

El hormigón Arquitectónico (HA) es un material compuesto que, además de poseer un amplio intervalo de resistencia mecánica y durabilidad, se destaca por la valoración estética de la superficie provista por su color y textura [1-3]. La valoración estética es una alternativa que extiende sus aplicaciones a monumentos, esculturas, elementos decorativos y mobiliarios urbanos [4-6]. Los principales componentes que contribuyen con el color son el cemento y los pigmentos. Muchas veces los colores proyectados no son alcanzados por las diferentes proporciones de los componentes sumados al elevado costo del pigmento y se desiste de elaborar la alternativa estética por medio de nuevos tonos. Un extenso estudio sobre el efecto del tipo e incremento de superfluidificante, del tipo y contenido de pigmentos tales como óxidos de hierro (colores rojo, amarillo y negro), negro de humo y ftalocianinas (azul y verde), y de las diferencias entre los cementos gris y blanco fue realizado para evaluar el color en morteros y hormigones autocompactantes coloreados [7]. El color fue definido según el sistema CIELAB estudiado por la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) [8-10] y permitió estimarlo a través de los parámetros luminosidad ( $L^*$ ), saturación ( $C^*$ ) y tono ( $h^*$ ) del hormigón luego de realizar pruebas en morteros colocados en moldes de acero o madera. No sólo el color del hormigón obtenido de las proporciones de sus componentes influye en la terminación superficial, también lo hace la rugosidad o el brillo conseguido en contacto

con el molde. Por lo tanto, color y brillo resultan variables determinantes en la apariencia de las mezclas cementíceas [10,11] y se los mide con un espectrofotómetro. Por otro lado, la rugosidad superficial, que es el conjunto de irregularidades en la superficie y la geometría del perfil, induce a suponer si el brillo será mayor o menor. Los parámetros que definen la geometría de una superficie se miden con un rugosímetro.

A partir de lo expuesto surge la necesidad de sistematizar el concepto color-terminación con los componentes que permiten producirlo para facilitar las diferentes aplicaciones. En el campo del color, la bibliografía existente, Ostwald [12], Munsell [13], Villalobos [14] y Natural Colour System (NCS) [15], presenta diferentes alternativas para sistematizarlo y, salvando las diferencias, persigue el propósito de ordenar los colores según algún criterio. Para sistematizar el color existen Sistemas o Atlas ordenados según diferentes principios que lo clasifican en rangos de luminosidad, saturación y tonalidad y quedan esquematizados en figuras. Poco se ha encontrado sobre las clasificaciones de las terminaciones superficiales y menos aún de estos atributos relacionados con mezclas cementíceas.

Lo expresado justifica la importancia y necesidad de elaborar un Atlas de Hormigón Arquitectónico. La recopilación de información se sostiene según tres ejes que deben interactuar para delimitar el alcance de este material. Uno de los ejes consiste en

el diseño de las mezclas, aquí se toman como punto de partida parámetros tales como las relaciones agua/cemento (que define el nivel de resistencia) y pigmento/cemento (que contribuye con el color) [7]; otro está relacionado con la geometría de la superficie en donde el material de los moldes y los tratamientos recibidos se asumen como los principales factores que modifican y definen las diferentes rugosidades [16-20] y, por último, está la decisión sobre los márgenes tolerables de cambio de color, brillo y rugosidad, sustentados a partir de mediciones de estos parámetros y la correspondiente evaluación visual.

Para la elaboración del Atlas es necesario verificar algunas hipótesis, entre ellas, si los cambios de color son importantes ante modificaciones del material del molde y, en función del tipo de pigmento; si la variación de color es importante al utilizar elevados contenidos de pigmento. A su vez, ya que las texturas producen diferentes sensaciones del color, se constatará que una superficie más pulida produce mayor oscuridad en la superficie. Por último, corroborar si el color es más claro luego de prolongados períodos de curados.

El presente trabajo describe el plan de actividades destinadas a elaborar y contribuir al desarrollo del Hormigón Arquitectónico y lograr una vinculación de este con diferentes aplicaciones que, partiendo de criterios técnicos y ágiles, justifiquen su elección para el uso en la construcción. La investigación tiene como propósito favorecer la elección de los aspectos estéticos limitados a la interacción entre las variables relacionadas con las mezclas de morteros y hormigones, los moldes y los entornos de emplazamiento. Por ello se propone una metodología para abordar el Atlas de Hormigón Arquitectónico. Este mecanismo de razonamiento se ejemplifica con el estudio de morteros coloreados y puede ser una propuesta para elegir mezclas con ciertas propiedades en estado fresco o endurecido, incluyendo los aspectos estéticos. Con los pasos que se describirán se pudieron obtener rápidamente Hormigones Autocompactantes

Coloreados. El Atlas se completa con inspecciones visuales, no incluidas en este ejemplo.

## ABORDAJE DEL ATLAS DEL HORMIGÓN ARQUITECTÓNICO

A continuación se describe el marco teórico que permitirá verificar las hipótesis planteadas y finalmente confeccionar el Atlas. El primer paso será: definir los materiales y las principales características que contribuirán a diseñar mezclas cementíceas. El criterio de elección es estudiar las más utilizadas en La Plata, Provincia de Buenos Aires. Luego, estas mezclas se colocarán en moldes de diferentes tipos y así conformar diferentes tipos de superficies. Las mezclas se fabricarán según parámetros de diseño y se utilizarán distintas técnicas y metodologías para evaluar las propiedades en estado fresco o endurecido de morteros y hormigones. Por último se evaluará su aspecto estético, en particular, se profundizará sobre la metodología de medición del color, brillo y rugosidad. Cabe destacar que los estudios en morteros permiten rápidamente obtener parámetros de diseños aplicables en los hormigones y tienen como objetivo principal abaratar costos y ahorrar tiempo [21].

### Elección y caracterización de materiales

Se seleccionarán y evaluarán diferentes agentes colorantes particulados. Estas partículas aglomeradas están constituidas por óxidos de hierro con diferente color (rojo, amarillo o negro); también se utilizarán ftalocianinas cúpricas azul o verde. Los ensayos a realizar incluyen, entre otros, la determinación del tamaño de partícula predominante [22], de la densidad [23] y humedad [24] con el fin de cuantificar las características mínimas que permitan formular mezclas cementíceas [3, 25]. El material cementante elegido será el cemento portland color gris [26, 27]. Se utilizarán contenidos de aditivos químicos entre los márgenes que produzcan mínima variación del color [3] y agregados que acompañen al color de la pasta cementícea [28-31].

## Elección de los moldes y su preparación

La terminación del hormigón también depende del molde, por ello se estudiarán diferentes materiales (acero, madera, plástico) y los agentes desmoldantes recomendados para estos se colocarán según indicaciones del fabricante en distintas cantidades. Los morteros preparados se colocarán en recipientes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 3 cm de altura y la base irá remplazándose según el material del molde; en cambio, los hormigones se prepararán dentro de moldes más grandes (50 cm x 50 cm x 5 cm).

## Diseño de mezclas

Se diseñarán mezclas de morteros según el procedimiento de mezclado indicado en la normativa europea EN12878 [32] y se la comparará con las especificadas en la normativa argentina IRAM 1622 [33]; como principales variables del estado fresco o endurecido se considerará la consistencia y la resistencia mecánica en morteros [33]. Para el diseño se tendrán en cuenta los parámetros relacionados con los efectos de los moldes seleccionados en el punto anterior y con la forma de colocación de las mezclas en estos.

Los parámetros de diseño incluirán estudios de mezclas realizadas con dos relaciones agua/cemento ( $a/c$ ), 0,40 y 0,45, indicadas en el reglamento CIRSOC 201 para hormigones que se encuentran sometidos a ambientes agresivos en la Argentina [34]. La cantidad de cemento se mantendrá fija. Considerando estos parámetros, en el primer caso la resistencia mecánica aumentará y para mantener la misma consistencia que se obtiene con una relación  $a/c$ : 0,45 se utilizará la cantidad de aditivo superfluidificante necesaria. Una vez determinadas las proporciones de agua, cemento y superfluidificante adecuados según la consistencia, conjuntamente con el agregado fino para cada relación  $a/c$  evaluada se estudiarán diferentes pigmentos en concentraciones menores a 10% calculadas según el peso del cemento [2, 32]; si bien se considerará un extenso barrido de estos

porcentajes para realizar verificaciones en mayor escala (por ejemplo hormigones), se evaluará el porcentaje de pigmento que se corresponda con la saturación ( $C^*$ ) de los agentes colorantes en morteros. Esto a los fines de correlacionar los resultados sobre Color-Molde-Mezcla con los hormigones.

## Métodos y técnicas para evaluar las propiedades en estado fresco de morteros y hormigones

En morteros y hormigones se evaluará el contenido de aire [35] y exudación [36] ya que pueden ser las propiedades que, además de modificar la resistencia mecánica entre otras, genera superficies con burbujas. Se evaluarán diferentes consistencias de morteros [33] y hormigones [37].

## Métodos y técnicas para evaluar las propiedades en estado endurecido de morteros y hormigones

En estado endurecido se evaluarán las propiedades mecánicas con los siguientes métodos: resistencia a la compresión y flexión de morteros [33] y hormigones [38]. Las muestras serán expuestas a diferentes condiciones de curado en laboratorio (21°C y 55 ó 95% de humedad) y exposiciones ambientales severas en atmósferas industriales.

## Métodos y técnicas para evaluar los aspectos estéticos de morteros y hormigones

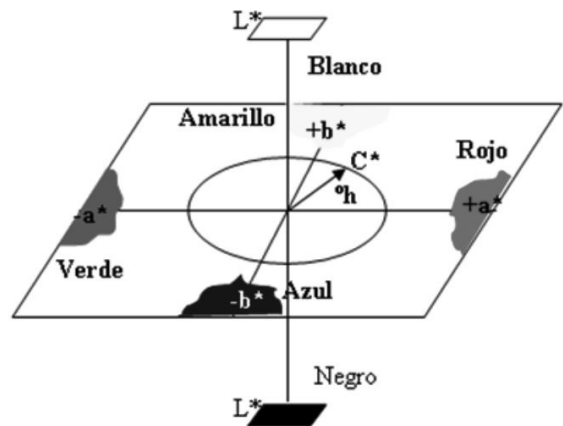
Los aspectos estéticos que se estudiarán estarán orientados a definir una metodología para evaluar superficies claras, oscuras y coloreadas [7] y la influencia del brillo de una superficie. El valor de las variables mencionadas se determinará con el espectrofotómetro BYK-Gardner. Este equipo permite evaluar el color y brillo de superficies. A su vez, el brillo se contrastará con la rugosidad medida con el rugosímetro Hommel Tester T1000 E. En primer lugar se caracterizarán estos aspectos y luego se sistematizará la información considerando diferencias de colores tolerables por el ojo humano y cuantificable según fórmulas de diferencia de color [9, 39]. También se considerará

la correlación entre los aspectos estéticos de los morteros y sus hormigones.

El color es una percepción sensorial que coexiste con tres elementos fundamentales: un objeto, un iluminante y un observador [8]. Tal como fuera indicado anteriormente, para evaluarlo se utilizará el modelo CIELAB el cual queda definido por tres variables que se representan en sistemas cartesianos o polares; en el primero se utilizan los valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  y, en el segundo, los parámetros luminosidad  $L^*$ , saturación  $C^*$  y tono  $h^*$  (Ver ecuación 1 y 2). El modelo se representa en un sistema ortogonal mediante un eje vertical llamado luminosidad ( $L^*$ ), que indica claridad u oscuridad, y un plano horizontal conformado por los ejes  $a^*$  y  $b^*$ . El eje  $a^*$  representa la variación rojo-verde, siendo positivo para el primero ( $+a^*$ ) y negativo para el segundo ( $-a^*$ ). El eje  $b^*$  representa la variación amarillo-azul, siendo positivo para el primero ( $+b^*$ ) y negativo para el otro ( $-b^*$ ) [9, 11]. Por otro lado, la saturación está asociada a qué tan vívido es un color y el tono ( $h^*$ ) es el ángulo que indica si el color es rojo ( $0^\circ$ ), amarillo ( $90^\circ$ ), verde ( $180^\circ$ ) o azul ( $270^\circ$ ). El modelo se presenta en la Figura 1. Este sistema ha permitido, además de definir el color, realizar determinaciones sobre la elección de técnicas de limpieza en fachadas construidas con piedras [40] u observar la evolución del daño en el hormigón provocado por el fuego [41]. También, permitió definir niveles de correlación del color entre morteros y hormigones [7]. Para comparar diferencias de color entre distintas muestras, evaluar la similitud o realizar reproducciones del color, se calcula el parámetro diferencia de color total ( $\Delta E^*$ ). Este parámetro permite juzgar niveles de diferencias de color percibidas por el ojo humano y desde 1931 la CIE continuamente está perfeccionando este indicador para acercarse con mayor exactitud a la realidad [9, 39, 42]. (ver ecuación 3).

Por otro lado el brillo es una percepción visual como resultado de la evaluación de una superficie iluminada tal que cuanto más luz directa se refleja mayor percepción del brillo se obtiene. Y es

interesante comparar los valores de rugosidad, siendo estos un conjunto de parámetros que definen el perfil de una superficie limitada. El principal parámetro es la rugosidad media aritmética ( $R_a$ ) y se mide en micrómetros (ver ecuación 4), ésta es proporcional al área encerrada entre la línea media y el perfil de la rugosidad y es un parámetro que ya lo calcula el equipo. La Figura 2 muestra la superficie encerrada ( $A$ ) y la longitud de medición ( $L_m$ ) a fin de interpretar el concepto  $R_a$  [43].



$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$h^* = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Figura 1. Espacio CIELAB.

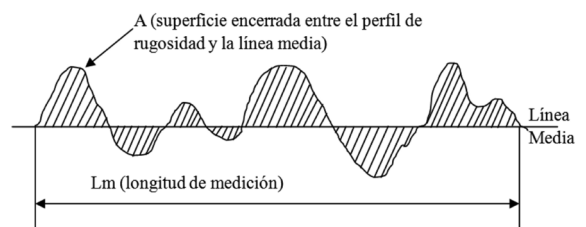


Figura 2. Perfil de rugosidad.

$$R_a = \frac{A}{L_m} \quad \text{Ecuación 4}$$



## EXPERIENCIAS

### Aplicación de la metodología en morteros coloreados para elaborar el atlas

Este apartado muestra el análisis de los resultados y el mecanismo de razonamiento para poder elaborar un Atlas y se lo ha ejemplificado desde el diseño de la mezcla hasta su fabricación. Para ello se realizan láminas que resumen los valores de resistencia mecánica, durabilidad y aspectos estéticos, según los pigmentos utilizados. Se elaboraron 10 morteros: uno control (c) con cemento gris G, caliza molida y tres grupos con cada uno de los pigmentos óxido de hierro de color rojo (r), amarillo (a) y negro (n), adicionados a razón de 3,5 y 7% del peso de cemento. Se empleó una relación caliza molida/cemento (f/c) en peso inicial igual a 0,80, y luego el contenido de pigmento se remplazaba por igual volumen de caliza molida por lo cual la relación f/c disminuía. La relación a/c fue de 0,50. El volumen de pasta fue de 56%.

Las propiedades físicas, la resistencia a compresión ( $f'_c$ ) y la composición química del cemento (G) y de la caliza molida (F) se detallan en la Tabla 1. La densidad del pigmento amarillo fue de 3,8 g/cm<sup>3</sup>, mientras que la de los pigmentos rojo o negro 4,75 g/cm<sup>3</sup>. Se utilizó una arena silícea natural de densidad 2,63 g/cm<sup>3</sup>, absorción de 0,5% y módulo de finura igual a 2,63. Se utilizó aditivo superfluidificante a base de policarboxilatos, igual a 0,30% en peso de cemento.

En estado fresco se estudió la fluidez a través de ensayos que miden el tiempo de pasaje en el embudo en V y el escurrimiento de los morteros.

No es aplicable aquí la norma IRAM 1622. En estado endurecido se estudiaron las propiedades físico-mecánicas (IRAM 1622) y durables (IRAM 1871). En lo referido a la evaluación de los aspectos estéticos de morteros y hormigones, y como se indicara en el punto Métodos y Técnicas, se realizaron mediciones de color, brillo y rugosidad.

**Tabla 1.** Composición química y propiedades físicas del cemento y de la caliza molida.

Composición química			Cemento	Caliza molida
			G	F
CaO	(%)		61,4	50,2
SiO <sub>2</sub>			21,7	9,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			4,0	1,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			4,1	0,7
SO <sub>3</sub>			2,9	0,1
MgO			1,1	0,3
K <sub>2</sub> O			0,9	0,4
Na <sub>2</sub> O			0,2	0,1
PPC			3,3	37,8
$f'_c$	1 d	(MPa)	-	-
	28 d	(MPa)	53,6	-
Densidad		(g/cm <sup>3</sup> )	3,10	2,80
Sup. Blaine		(m <sup>2</sup> /kg)	350	1037

Para estas evaluaciones se llenaron recipientes de plástico con cada serie de mortero. Los morteros se colaban sin compactación. Se analizaron las caras en contacto con el molde (m) y las caras expuestas al aire (e), estas últimas sin ningún agente desmoldante en el molde o algún alisado.

La Tabla 2 muestra las proporciones de materiales utilizados en los morteros. El mortero control se identifica como c y los morteros coloreados en función del color y porcentaje de pigmento.

Para analizar el efecto de la incorporación de distintos tipos y contenidos de pigmento en el estado fresco, se determinaron los valores de tiempo de pasaje (TP) medido en el embudo en V y los valores de diámetro final (DF) obtenidos con el cono para escurrimiento. El tiempo de pasaje se obtiene midiendo el tiempo que tarda el mortero en escapar del embudo luego de abrir una trampa, dicho ensayo se repite tres veces y se promedian los valores [7, 45]; y el diámetro final se obtiene llenando el cono con mortero [7, 45], luego se levanta y, cuando el mortero deja

Tabla 2. Proporciones de materiales en morteros con pigmentos r, a y n.

Mortero	f/c	p/c (%)	Agua	Cemento	Caliza Molida	Pigmento	Arena
			(kg/m <sup>3</sup> )				
c	0,80	0	251	502	402	0	1165
r3	0,78	3			393	15	
r5	0,77	5			387	25	
r7	0,76	7			381	35	
a3	0,78	3			391	15	
a5	0,76	5			383	25	
a7	0,75	7			376	35	
n3	0,78	3			393	15	
n5	0,77	5			387	25	
n7	0,76	7			381	35	

de escurrir, se miden dos diámetros ortogonales. Estos parámetros dan una idea de la viscosidad y movilidad, respectivamente. El mortero sin pigmento (c) alcanzó parámetros iguales a 4,0 s y 318 mm. El uso de pigmento rojo (r) ocasionó variaciones mínimas de TP en el orden del 5% y los pigmentos amarillo (a) o negro (n) incrementos del 20%. El TP obtenido con el pigmento rojo se mantuvo en 4,0 s; con el amarillo aumentó de 4,4 a 5,3 s y con el pigmento negro de 5,4 a 6,5 s. En cuanto al escurrimiento, el incremento de pigmento rojo (r) no provocó cambios significativos (r3 sólo cambió un 2% respecto al mortero c y los pigmentos color amarillo (a) y negro (n) dieron disminuciones del 25% y 17%, respectivamente. Los aumentos de TP y las disminuciones de DF verificaron las modificaciones de la viscosidad y movilidad provocadas por incrementos de los pigmentos amarillo y negro. Esto no sucedió para contenidos menores de pigmentos a y n. Mientras el pigmento rojo tuvo un efecto similar al que provoca el filler, los pigmentos amarillo y negro, en especial para reemplazos del 5 ó 7%, provocaron cambios importantes. Esto sugiere la posibilidad de disminuir el contenido de filler calizo si es necesario mantener los parámetros de TP y DF del mortero c. Por otro lado, las determinaciones del peso unitario (PU) con los pigmentos rojo o amarillo

estuvieron comprendidas entre 2100 y 2150 kg/m<sup>3</sup> mientras que con el pigmento negro disminuyó a valores entre 2050 y 2090 kg/m<sup>3</sup>. Esta disminución sugiere que con el uso de pigmento negro hubo un incremento del contenido de aire y se corresponde con los aumentos de TP. Los cambios en el contenido de aire conllevan modificaciones en el estado endurecido como pueden ser, en este caso, disminución de la resistencia y densidad, mayor absorción y sus consecuentes probabilidades de menor durabilidad. En cuanto a la resistencia a compresión varió entre 35 y 45 MPa, lo que puso en evidencia que tampoco puede desatenderse el efecto de distintos contenidos de pigmento sobre la resistencia. En el caso del pigmento rojo la resistencia disminuyó ligeramente y ocurrió lo contrario cuando aumentó el contenido de pigmento amarillo. En el primer caso no se detectaron diferencias en el peso unitario en estado fresco pero las modificaciones en los valores de succión capilar podrían indicar diferencias en el tamaño de poros. Por su parte la forma angulosa de las partículas del pigmento amarillo podría justificar un ligero aumento de la resistencia. Los morteros con pigmento negro fueron menos resistentes y se lo atribuyó a un claro incremento en el contenido de aire. Los resultados de resistencia a flexión son consistentes con los obtenidos en compresión y el

módulo de rotura fue en promedio 7,5 MPa. La densidad y la absorción fueron iguales a 1,8 g/cm<sup>3</sup> y 10%, respectivamente.

En general no se apreciaron cambios significativos en los valores de succión capilar. La capacidad de succión aumentó pronunciadamente de 4405 a 5400 g/m<sup>2</sup> cuando se incrementó el pigmento rojo y no ocurrió lo mismo con el uso de pigmento amarillo o negro. Sin embargo la velocidad de succión capilar aumentó en todos los casos para los mayores contenidos de pigmento, lo que puede indicar nuevamente alguna diferencia en la distribución de poros.

En la Tabla 3 se detallan la luminosidad L\*, la saturación C\*, el tono h\*, el brillo B y la rugosidad media aritmética Ra de los morteros. Se analizaron caras en contacto con los moldes (m) y caras expuestas al aire (e). Los desvíos estándar fueron mínimos y de similar magnitud en ambas caras. En este caso se utilizaron muestras cilíndricas (h:35mm; d:70mm) y una densidad de medición en ambas superficies igual a 0,068 medidas/cm<sup>2</sup>.

El mortero c mostró menor valor de L\* en la cara m (71,7) que el medido en la cara e. Cuando el contenido de pigmento rojo aumentó, L\* disminuyó de 50,7 a 45,4, C\* de 21,8 a 31,4 y h\* varió entre 30° y 35°, en la cara m. Los valores de L\*, C\* y h\*

en la cara m fueron similares a los registrados en la cara e. Con el uso de mayor contenido de pigmento amarillo, disminuyeron los valores de L\* (68,6-59,4) conforme aumentó C\* (25,9-37,1) y el tono varió entre ángulos de 81,1° y 73,2°. En la cara e de los morteros rojos o amarillos, L\* y C\* variaron de la misma forma que en la cara m, sin embargo el rango de variación fue menor y h\* permaneció muy similar. Cuando se utilizó pigmento negro las variaciones de L\* y C\* fueron muy diferentes a las mencionadas anteriormente; mientras L\* disminuyó, C\* fue de magnitud constante e inferior a los valores medidos en los morteros con pigmento r y a. L\* disminuyó de 54,2 a 49,6 en la cara m y manifestó un fuerte oscurecimiento de 44,9 a 37,2 en la cara e. Dicha disminución se atribuyó a la segregación de pigmento observada en el ensayo de escurrimiento de morteros, que dio lugar a una acumulación en la superficie en contacto con el aire. Esta elevada disminución da cuenta de que puede producirse una importante variación del color cuando se use pigmento negro según las diferentes caras de contacto, por lo que puede ser recomendable corroborar el color en estudios sobre morteros.

A su vez, los valores de brillo B mostraron un comportamiento aleatorio. Los valores medidos en las caras en contacto con el molde (m) y expuestas al aire (e) se encontraron con mayor repetición,

**Tabla 3.** Color, brillo y rugosidad en morteros con pigmentos r, a y n.

M	Cara en contacto con molde (m)					Cara expuesta al aire (e)				
	L*	C*	h*	B	Ra	L*	C*	h*	B (%)	Ra $\mu$ m)
c	71,7	4,1	79,6	6,27	1,15	74,4	5,1	79,1	8,82	0,51
r3	50,7	21,8	30,2	0,89	0,08	53,2	26,7	31,1	1,10	1,6
r5	45,8	31,4	35,0	0,85	1,54	49,0	28,0	31,4	1,72	3,42
r7	45,4	33,3	35,1	0,84	1,17	45,2	30,9	32,2	1,45	0,15
a3	68,6	25,9	81,1	7,11	0,74	69,2	32,2	79,1	22,12	0,70
a5	68,4	32,8	77,9	2,71	1,05	63,8	34,4	76,8	1,27	2,68
a7	59,4	37,1	73,2	0,82	1,57	62,4	33,7	74,5	2,32	3,43
n3	54,2	0,9	100,5	2,41	1,19	44,9	0,20	102,7	2,22	1,10
n5	57,2	1,2	244,0	1,44	1,33	40,8	0,40	249	3,62	1,64
n7	49,6	2,1	250,8	1,18	1,26	37,2	1,60	258,6	0,84	1,46



entre los límites marcados por 0,82 y 3,62 y algunos casos esporádicos desde 6,27 hasta 22,1. Es probable que los elevados valores de brillo en la cara expuesta al aire se deban a la acumulación de partículas en la superficie que aumenta la posibilidad de reflejar más luz, sin embargo es un suceso que no se repite en todos los casos. Por otro lado, era de esperar que el brillo obtenido en las superficies en contacto con el molde fueran más brillosas debido al carácter impermeable que tienen el plástico sin embargo sucedió lo contrario. Independientemente de la aleatoriedad registrada en el brillo, los resultados son consistentes con los obtenidos en la rugosidad (Ra) o sea que elevados valores de brillo (B) fueron consistentes con menores valores de Ra. Dicho de otra forma, esto significa que a mayor brillo corresponde menor rugosidad. Esta menor rugosidad está dada por la gran acumulación de partículas una al lado de la otra y consecuente disminución de la superficie encerrada entre el perfil de rugosidad y la línea media. Por último, es difícil con los datos obtenidos definir cuál es el parámetro B y Ra que caracterizan a las superficies analizadas. Quizá prescindir del agente desmoldante, sustancia utilizada para homogeneizar superficies, y del tratamiento sobre la cara expuesta, como ser un simple alisado, es causal de la heterogeneidad de las mezclas cementíceas desde el punto de vista estético.

Luego de este desarrollo experimental y análisis de los resultados se diagraman las Láminas 1 (rojo), Lámina 2 (amarillo) y Lámina 3 (negro) que son una alternativa de información sistematizada. Se presentan graficados los parámetros relacionados con el color: Saturación  $C^*$  y Luminosidad  $L^*$  con el incremento de pigmento (p/c) y luego se comparan los valores de diferencia de color total entre cada contenido de pigmento, esto para ambas caras estudiadas. Se grafica el Brillo B y la Rugosidad Ra también con el incremento de pigmento. Estas gráficas fueron realizadas para las caras en contacto con el molde (m) y expuestas al aire (e). En cada lámina se incluye una tabla con las propiedades en estado fresco o endurecido.

Como ejemplo, si resulta que es necesario llenar un elemento que debe reunir una apariencia superficial rojiza, observando en la lámina 1 podemos utilizar entre 5 y 7 % de pigmento rojo en peso del cemento ya que en estos márgenes la saturación no se ve modificada al igual que la luminosidad.

En la Tabla quedan indicadas las características principales en estado fresco y estado endurecido que se obtienen con morteros realizados con materiales bien conocidos. (ver Láminas 1).

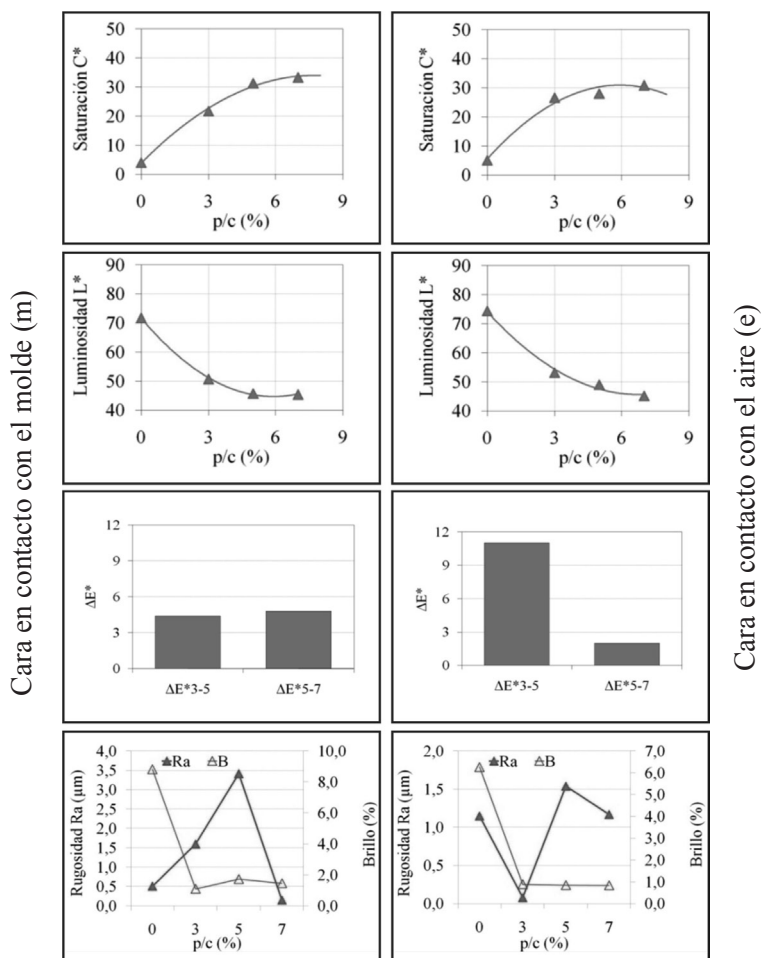
## CONSIDERACIONES FINALES

El Hormigón Arquitectónico es aquel que genera impacto visual debido a su apariencia estética. Dicha apariencia está valorada por su blancura o color, además de su textura. Para embellecer la superficie se prefieren dos materiales de construcción: el cemento blanco y los pigmentos óxidos de hierro. Además, son muy importantes las características de la superficie que estará en contacto con el hormigón ya que el color y la textura serán diferentes para la misma mezcla. A su vez, debe cumplir propiedades que permitan su transporte, colocación, compactación y durabilidad. Este trabajo presentó una metodología que permite abordar rápidamente lo expuesto. En primer lugar fija los parámetros de diseño que involucran al cemento y al pigmento, principales causantes del color; luego indica las técnicas para evaluar las propiedades en estado fresco o endurecido y profundiza sobre los aspectos estéticos. Aquí, el color, el brillo y la rugosidad protagonizan la apariencia de la superficie, que se verifica con inspecciones visuales. Por último, se elaboran las láminas que se incluirán en el Atlas.

La metodología propuesta fue ejemplificada con un grupo de morteros coloreados con 3, 5 y 7 % de pigmentos óxidos de hierro rojo, amarillo o negro. Los caracterizó una elevada fluidez y moderada viscosidad y resistencia a compresión entre 35 y 45 MPa, entre otras propiedades; como es de esperar, a medida que aumenta el contenido de pigmento

## Lámina 1. Pigmento Rojo

Color	Pigmento/ Cemento	Agua/ Cemento	Caliza Molida/Cemento	Superfluidificante/cemento	Volúmen de Pasta
Rojo	p/c (%)	a/c	f/c	Sp/c (%)	(%)
	3, 5, 7	0,50	0,80, 0,78, 0,77, 0,76	0,30	56

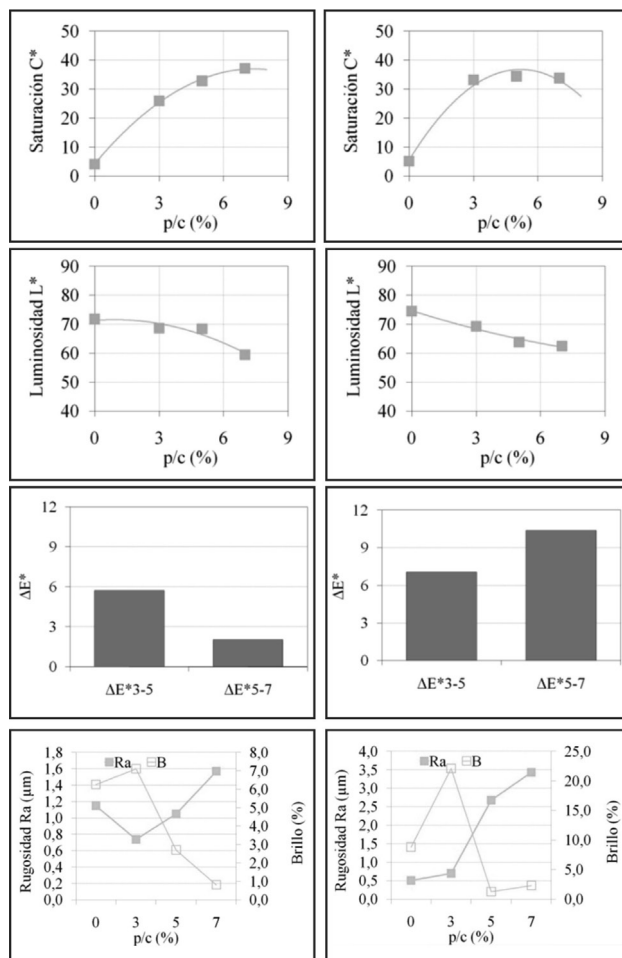


Morteros	Estado Fresco			Estado Endurecido					
	FT	SF	PU	Resist. Compresión	Módulo de Rotura	Dsss	Abs	C	S
	(s)	(mm)	(kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(MPa)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> /s <sup>1/2</sup> )
c	4,0	318	2073	40,9	7,7	1,83	9,5	4405	5,48
r3	3,8	325	2110	44,6	8,4	1,80	9,6	4096	5,02
r5	4,0	320	2127	42,1	8,0	1,83	9,9	5072	5,88
r7	4,0	313	2114	37,7	7,3	1,84	9,7	5386	5,82

## Lámina 2. Pigmento Amarillo

Color	Pigmento/ Cemento	Agua/ Cemento	Caliza Molida/Cemento	Superfluidificante/ cemento	Volúmen de Pasta
Amarillo	p/c (%)	a/c	f/c	Sp/c (%)	(%)
	3, 5, 7	0,50	0,80, 0,78, 0,77, 0,75	0,30	56

Cara en contacto con el molde (m)

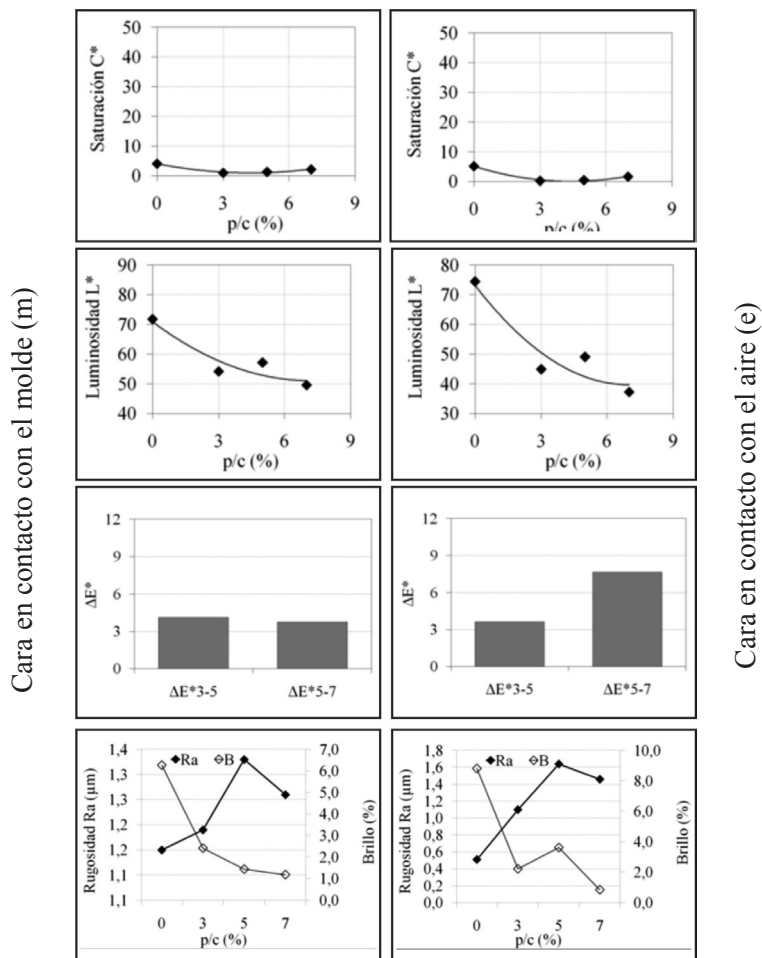


Cara en contacto con el aire (e)

Morteros	Estado Fresco			Estado Endurecido					
	FT	SF	PU	Resist. Compresión	Módulo de Rotura	Dsss	Abs	C	S
	(s)	(mm)	(kg/m³)	(MPa)	(MPa)	(g/cm³)	(%)	(g/m²)	(g/m²/s¹/²)
c	4,0	318	2073	40,9	7.7	1,83	9,5	4405	5,48
r3	4,4	315	2096	35,5	7.6	1,85	10,0	4605	5,17
r5	4,5	291	2127	37,4	7.7	1,85	9,9	4847	5,03
r7	5,3	265	2131	40,4	7.7	1,86	9,8	4787	5,62

## Lámina 3. Pigmento Negro

Color	Pigmento/ Cemento	Agua/ Cemento	Caliza Molida/Cemento	Superfluidificante/ cemento	Volúmen de Pasta
Negro	p/c (%)	c/a	f/c	Sp/c (%)	(%)
	3, 5, 7	0,50	0,80, 0,78, 0,77, 0,75	0,30	56



Morteros	Estado Fresco			Estado Endurecido					
	FT	SF	PU	Resist. Compresión	Módulo de Rotura	Dsss	Abs	C	S
	(s)	(mm)	(kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(MPa)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> /s <sup>1/2</sup> )
c	4.0	318	2073	40.9	7.7	1.83	9.5	4405	5.48
r3	5.4	320	2039	38.4	7.3	1.89	9.8	4515	5.15
r5	5.6	292	2062	39.3	7.1	1.88	9.8	4628	5.17
r7	6.5	265	2080	39.7	7.2	1.87	9.6	4421	5.13

rojo o amarillo la saturación se incrementa y la luminosidad disminuye. Con el incremento de pigmento negro sólo disminuye la luminosidad. El parámetro diferencia de color total permite juzgar el nivel de variación del color que existe entre dos contenidos diferentes de pigmento, y sigue siendo muy útil para decidir sobre el contenido óptimo de pigmento.

Por último, el brillo y la rugosidad presentaron resultados muy aleatorios para afirmar el tipo de influencia que tienen los moldes y tratamientos sobre la terminación superficial.

## AGRADECIMIENTOS

A las autoridades del Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), Ing. Luis Traversa e Ing.

Ángel Di Maio que permiten desarrollar en dicha institución el plan de Beca Postdoctoral. A CONICET que otorgó la Beca y también al Dr. Romagnoli por facilitar equipamiento del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIDEPINT).

Los resultados presentados fueron posibles a la desinteresada colaboración del personal del LEMIT y del CIDEPINT.

Algunos de los resultados aquí presentados se corresponden con los datos publicados en el capítulo 4 “Diseño del Hormigón Autocompactante Coloreado” de mi trabajo de Tesis Doctoral dirigido por Dr. Raúl Zerbino y Co-dirigido por Ing. Ángel Oshiro, a quienes también les agradezco por la dedicación en esa labor.

## REFERENCIAS

- 1.- Humberto B, Pereira M. Concreto: Forma, Textura e Cor. En Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações. Brasil: IBRACON; 2005:1413-1451.
- 2.- Benítez A, Bálsamo H. Hormigones arquitectónicos: blanco y coloreado. En Hormigones Especiales. La Plata, Argentina: Autoeditor; 2004: 309-330.
- 3.- Püttbach E. Pigments for the Colouring of Concrete-Questions of Quality, BFT/Concrete Precasting Plant and Technology. 1992; 10, en [www.BFT-online.info](http://www.BFT-online.info).
- 4.- Bennett D F H. Innovations in Concrete. London: Thomas Telford; 2002.
- 5.- Bennett D F H. The Art of precast concrete, colour texture expression Birkhäuser – Publishers for Architecture. Basel, Switzerland: Birkhauser Verlag AG; 2005.
- 6.- Expertunforum Sichtbeton. Sichtbeton-Architektur pur. 2007: 64 p.
- 7.- López A. “Diseño y Caracterización del Hormigón Autocompactante Coloreado”. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 2012. 189 p.
- 8.- Lozano R D. El color y su medición. Bs As: Américalee S.R.L; 1978.
- 9.- CIE 15. Technical Report draft. Colorimetry. 3 Edition. 82 p.
- 10.- Hunter R S. The Measurement of Appearance. New York: John Wiley & Sons; 1975

- 11.- Lozano R D. A new approach to appearance characterization. *Color Res Appl* 2006;31:164-167.
- 12.- Ostwald, citado por Caivano J L. Armonías del color. *GAC Revista* 2004;7,19, abril: 1-21.
- 13.- Munsell Book of Color. Neighboring Hues Edition. Matte Finish Collection, 1970: 48.
- 14.- Villalobos Domínguez C, Villalobos J. Atlas de los colores. Bs As: El Ateneo; 1947.
- 15.- NCS – the international language of colour for specification, communication and control of colour in design, architecture, education, research, marketing and manufacturing: 42.
- 16.- CIB REPORT NO 24 “Tolerances on Blemishes of Concrete”, Report Prepared By Cib Working Commission W29 Concrete Surface Finishings, 1977: 14.
- 17.- Freimann T., “Sichtbetonbauwerke, Besonderheiten für Planung und Ausführung nach aktuellem Regelwerk”. Gerorg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg. 18p.
- 18.- Schulz J., Basic principles of exposed concrete evaluation. *CPI-Concrete Plant International*, 2006; 5, October: 140-144.
- 19.- Lemaire G, Escadeillas G, Ringot E. Evaluating concrete surfaces using an image analysis process. *Const Build Mat* 2005; 19, 8: 604-611.
- 20.- Betonflächen und Schalungshaut. Kommentar zur DIN 18217 von Jürgen Schmidt-Morsbach von Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften. 1985.
- 21.- Tobes, J.M., “Hormigones Autocompactantes simples y reforzados con fibras: diseño, caracterización y aplicaciones. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 2009. 262p.
- 22.- ASTM D 185 Test Methods for Coarse Particles in Pigments, Pastes, and Paints.
- 23.- ASTM D 153 Standard Test Methods for Specific Gravity of Pigments
- 24.- ASTM D 280 Test Methods for Hygroscopic Moisture (and Other Matter Volatile Under the Test Conditions) in Pigments.
- 25.- Cornell R M, Schwertmann U. Introduction. En *Industrial Inorganic Pigments*, editado por G. Buxbaum y G. Pfaff. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2006.
- 26.- IRAM 1504: 1986. Cemento pórtland. Análisis químico.
- 27.- IRAM 1624: 2005. Cemento. Método de ensayo para la determinación de la densidad.
- 28.- IRAM 1512: 1994. Agregado fino natural para hormigón de cemento portland.



- 29.- IRAM 1533: 2002. Agregados gruesos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.
- 30.- IRAM 1520: 2002. Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.
- 31.- IRAM 1647: 1994. Agregados para hormigón de cemento portland. Métodos de ensayo.
- 32.- EN 12878: 2005. Pigments for colouring of building materials based on cement and/or lime -Specification and methods of test.
- 33.- C ASTM 1437: 2007. Standard test method for flow hydraulic cement mortar. IRAM 1622: 2002. Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas.
- 34.- Reglamento CIRSOC 201. Reglamento de estructuras de hormigón. INTI. Julio 2005.
- 35.- IRAM 1602-1/1602-2: 1988. Hormigón fresco. Contenido unitario de aire. Método de presión.
- 36.- IRAM 1604: 2003. Hormigón. Método de ensayo para determinar la exudación.
- 37.- IRAM 1536:1978. Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono.
- 38.- IRAM 1546: 1992 Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión.
- 39.- Melgosa M M, Huertas R, Relative significance of the terms in the CIEDE2000 and CIE94 color-difference formulas. Optical Society of America 2004; 21,12: 1-7.
- 40.- Fort R F, Mingarro M C, López J, Rodríguez B. Chromatic parameters as Performance Indicator for Stones Cleaning Techniques. Color Res and Appl 2000; 25: 442-446.
- 41.- Annerel E., Taerwe L., Methods to quantify the colour development of concrete exposed to fire. Const Build Mater. 2011; 25: 3989-3997.
- 42.- Sharma G, Wu W, Dalal N. Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations CIE. Color Res Appl 2000;30: 21-30.
- 43.- Manuel Hommel Tester T1000 E.
- 44.- IRAM 1871. Hormigón. Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua para hormigón endurecido.
- 45.- Okamura, H. y Ouchi, M. Self-compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003; 1, 1: 5-15.